

## Simulation of phosphate transfer cycle in Zanjanrood River using SWAT model

Farhad Mishaghi<sup>1\*</sup>, Parisa Asgari<sup>2</sup> and Maryam Nouri<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Assistant Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran

<sup>2</sup> Msc of Irrigation and Drainage Expert, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran

<sup>3</sup> Msc of Irrigation and Drainage, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Received: 21 April 2022

Accepted: 22 August 2022

### Extended abstract

#### Introduction

The availability of water for agriculture is of great importance, and despite the water crisis that is becoming more severe every year, both quantitatively and qualitatively, this issue should be seriously considered. Water resources include surface and groundwater, which are qualitatively more at risk, therefore, in order to preserve them, the sources of pollution must be known and appropriate solutions must be provided to prevent or eliminate these pollutions.

#### Materials and methods

In this research, phosphate transfer cycle in Zanjanrood Watershed has been simulated using SWAT model. For calibration and validation, SWAT-CUP software and measured values of average monthly current intensity at Sarcham hydrometric station between (1996-2013) were used and 26 sensitive parameters were selected for sensitivity analysis. There are three options for irrigation method, three options for fertilizer application and two combined options. In order to analyze the uncertainty of the indicators p-factor and r-factor and to analyze the quality of the model results, two indices of coefficient of determination ( $R^2$ ) and nash-sutcliffe coefficient (NS) have been used.

#### Results and discussion

In the monthly runoff calibration stage, at the output of the field, the coefficients of r-factor, p-factor,  $R^2$ , NS were 0.27, 0.11, 0.83 and 0.53, respectively, and in the validation stage were 0.60, 0.18, 0.73 and 0.53, respectively. The results showed that with increasing the level of pressurized irrigation, the amount of phosphate contamination at the outlet of the basin did not change significantly. Regarding the amount of fertilizer, the 50% reduction in the consumption of phosphate fertilizers has reduced the amount of phosphate entering the Zanjanrud River by 19.2%. On the other hand, a 50% increase in the use of fertilizers has increased the input phosphate by 17.7%.

#### Conclusion

The results showed the proper performance of the SWAT model and its ability in the mentioned simulation. Also, by changing the surface irrigation method to subsurface and increasing the irrigation efficiency, there is no significant change in the average amount of phosphate output from the basin. On the other hand, by reducing the amount of fertilizer and preventing improper fertilization by farmers, pollution of surface and groundwater resources can be greatly prevented.

---

\* Corresponding author: farhad\_misaghi@znu.ac.ir

**Keywords:** Fertilizer, Irrigation system, Phosphate fertilizers, Sarchem hydrometer station, Surface water sources

Cite this article: Mishaghi, F., Asgari, P., Nouri, M., 2023. Simulation of phosphate transfer cycle in Zanjaanrood River using SWAT model. *Watershed Engineering and Management* 15 (3), 351-366.

© 2023, The Author(s). Published by Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



## شبیه‌سازی چرخه انتقال فسفات در رودخانه زنگان‌رود با استفاده از مدل SWAT

فرهاد میثاقی<sup>۱\*</sup>، پریسا عسگری<sup>۲</sup> و مریم نوری<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

<sup>۳</sup> کارشناس ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۳۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۱

### چکیده مبسوط

#### مقدمه

وجود آب برای کشاورزی، از اهمیت بالایی برخوردار است و با وجود بحران آبی که همه ساله هم به صورت کمی و هم به صورت کیفی شدیدتر می‌شود، بایستی به‌طور جدی به این مساله توجه شود. منابع آب شامل آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌شود که از نظر کیفی، آب‌های سطحی در معرض خطر بیشتری هستند، بنابراین، برای حفظ آن‌ها باید منابع آلودگی را شناخته و راهکارهای مناسب برای پیشگیری یا رفع این آلودگی‌ها ارائه شود.

### مواد و روش‌ها

در این پژوهش، چرخه انتقال فسفات در حوزه آبخیز زنگان‌رود با استفاده از مدل SWAT شبیه‌سازی شده است. برای واسنجی و اعتبارسنجی از نرم‌افزار SWAT-CUP و مقادیر اندازه‌گیری شده شدت جریان متوسط ماهانه در ایستگاه آب سنجی سرچم بین سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۳، استفاده شده و برای تحلیل حساسیت نیز ۲۶ پارامتر حساس، انتخاب شده است. سه گزینه برای شیوه آبیاری، سه گزینه برای میزان کود مصرفی و دو گزینه تلفیقی تعریف شده است. به منظور تحلیل عدم قطعیت از شاخص‌های p-factor و r-factor و برای تحلیل کیفیت نتایج مدل، از دو شاخص ضریب تعیین ( $R^2$ ) و ضریب نش-ساتکلیف (NS)، استفاده شده است.

### نتایج و بحث

در مرحله واسنجی رواناب ماهانه در خروجی حوضه، ضرایب r-factor، p-factor،  $R^2$ ، NS، به ترتیب ۰/۲۷، ۰/۱۱، ۰/۸۳ و ۰/۵۳ و در مرحله اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۶۰، ۰/۱۸، ۰/۷۳ و ۰/۵۳ به دست آمده است. نتایج نشان داد که با افزایش سطح آبیاری تحت فشار، میزان آلودگی فسفات در خروجی حوضه تغییر چشم‌گیری ندارد. در رابطه با میزان کود، کاهش ۵۰ درصدی مصرف کودهای فسفاته، مقدار فسفات ورودی به رودخانه زنگان‌رود را به میزان ۱۹/۲ درصد کاهش داده است. از طرفی، افزایش ۵۰ درصدی مصرف کودها، فسفات ورودی را به میزان ۱۷/۷ درصد افزایش داده است.

### نتیجه‌گیری

نتایج حاکی از عملکرد مناسب مدل SWAT و توانایی آن در شبیه‌سازی مذکور بود. همچنین، با تغییر شیوه آبیاری سطحی به تحت فشار و افزایش راندمان آبیاری، تغییر چشمگیری در میانگین میزان فسفات خروجی از سطح حوضه

ایجاد نمی‌شود. از طرفی با کاهش مقادیر کوددهی و جلوگیری از کوددهی بی‌رویه به‌وسیله کشاورزان، به میزان زیادی می‌توان مانع آلودگی منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی شد.

### واژه‌های کلیدی: ایستگاه آب‌سنجی سرچم، سامانه آبیاری، کود، کودهای فسفاته، منابع آب‌های سطحی

#### مقدمه

آلودگی غیرنقطه‌ای نتیجه انباشته شدن مقادیر آلودگی است که از یک حوضه بزرگ گرد آمده‌اند. به طور مثال، فرسایش ترکیب‌های نیتروژن از زمین‌های کشاورزی که کوددهی شده‌اند. همچنین، زهاب مواد مغذی که از جریان ورقه‌ای که بر زمین کشاورزی یا جنگل جاری می‌شود، وارد سیلاب‌ها می‌شود نیز به‌عنوان مثالی از آلودگی غیرنقطه‌ای ذکر شده است (Naramngam and Tong, 2013).

آلودگی غیرنقطه‌ای آب که آلودگی از نوع پخشیدگی نیز شناخته می‌شود، ناشی از فعالیت‌های وسیع گروهی از افراد بشر است که منبع آلودگی آن‌ها یک نقطه مشخص ندارد. در مقایسه با آلودگی نقطه‌ای که ناشی از فعالیت‌های صنعتی است، به کمیت در آوردن و کنترل این نوع آلودگی بسیار مشکل است. با وجود تحقیقات بسیار که در دهه‌های اخیر بر روی کنترل عملیات مدیریتی کشاورزی برای به کمینه رساندن آلودگی آب، بخش کشاورزی، همچنان یک منبع اصلی انتشار آلودگی‌های آب و تخریب کیفیت آب در سرتاسر جهان است.

لذا، اخیراً در سراسر جهان و در مدیریت جامع کیفی آب، توجه همگان به آلودگی ناشی از عملیات کشاورزی معطوف شده است. به‌ویژه این که میزان این آلودگی‌ها در کشورهای رو به توسعه، بسیار بحرانی است. تخریب کیفی آب‌های سطحی و زیرزمینی ناشی از عملیات کشاورزی به سه دسته طبقه‌بندی می‌شوند که شامل الف) افزایش فرسایش و از بین رفتن خاک به‌دلیل عملیات کشاورزی، ب) آلودگی شیمیایی به وسیله کودها و آفت‌کش‌ها و پ) آلودگی ناشی از پرورش دام، است.

کاهش آلودگی آب، ناشی از عملیات کشاورزی باید در قالب حرکت به سوی کشاورزی پایدار صورت گیرد (Asadi, 2005). ارزیابی آلودگی حاصل از فعالیت‌های کشاورزی، شیوه‌های مدیریتی خاصی را

وجود آب برای کشاورزی، از اهمیت بالایی برخوردار است و امروزه بحران آب وجود دارد که همه ساله هم به‌صورت کمی و هم به‌صورت کیفی جدی‌تر می‌شود. کشورهای توسعه یافته از مدت‌ها قبل به فکر حفظ منابع آبی بوده‌اند و اکنون زمان آن رسیده که به‌طور جدی به این مساله توجه شود. رودخانه‌ها، یکی از منابع اساسی تامین آب برای مصارف گوناگون از جمله کشاورزی، شرب و صنعت هستند.

تمدن‌های بشری بسیاری در کنار رودخانه‌ها شکل یافته‌اند، چرا که بشر برای ادامه حیات، رشد و بالندگی اجتماعی از گذشته تا به امروز به این ماده حیاتی نیازمند است. با رشد و پیشرفت جوامع و کمبود منابع آب مورد استفاده، بشر با تلاش‌های فراوان به دنبال این بوده است که منابع آب را به کنترل خود درآورد و در نهایت، استفاده بهینه را از منابع موجود و محدود در دسترس، ببرد. وجود رودخانه‌های متعدد، پر آب، طولیل و عاری از آلودگی، عامل مهم و اساسی در شکوفایی، رشد و توسعه همه جانبه جوامع بوده است. از میان آسیب‌های زیست‌محیطی، آلودگی منابع آب، یکی از مهمترین مواردی است که جهان امروز با آن دست به گریبان است (Bagherzadeh et al., 2009).

منابع آلاینده آب به دو گروه منابع نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای تقسیم می‌شوند. آلودگی‌های ناشی از منابع نقطه‌ای<sup>۱</sup>، به دسته‌ای از آلودگی‌ها اطلاق می‌شود که از طریق آبراه‌های از یک منبع مجزا و متمایز وارد آب شوند. به‌عنوان نمونه، از این منابع می‌توان از تخلیه فاضلاب تصفیه‌خانه‌ها، فاضلاب کارخانه یا فاضلاب شهری نام برد. آلودگی‌های ناشی از منابع غیرنقطه‌ای<sup>۲</sup>، یا بی‌کانون، به آلودگی‌هایی اشاره می‌کند که انتشار آن‌ها از یک منبع مجزا ناشی نمی‌شود.

<sup>1</sup> Point Source pollution (PS)

<sup>2</sup> Non-Point Source pollution (NPS)

استفاده از یک سامانه مقدار استاندارد برای آفت‌کش‌ها، استفاده از کمپوست به جای کود شیمیایی، آماده‌سازی خاک اطراف ریشه قبل از کوددهی و کاهش استفاده از مواد شیمیایی به‌خصوص در مواقع باران شدید (Markantonatos et al., 1995) است.

برای یافتن بهترین BMP، برای کاهش نیتروژن رودخانه، Lucy و Andrew در سال (2007) با بررسی انواع روش‌های مدیریت مانند کاهش مصرف کود و تغییر کاربری اراضی و غیره، مالیات بر نیتروژن را بهترین سیاست ارزیابی کردند، ولی این نکته را اضافه کردند که این روش موجب کاهش محصول می‌شود و باید مقدار بهینه کاهش کود، در نظر گرفته شود (Lucy and Andrew, 2009). در یونان نیز در سال ۲۰۰۷، با مدل SWAT، تاثیر کاربری اراضی و تغییر مدیریت محصول با تعیین سناریوهایی بررسی شد. نتایج نشان داد که از بین گیاهان در نظر گرفته شده، فقط پنبه و گندم در کاهش نیتروژن تاثیر داشتند و همچنین، به این نتیجه رسیدند که از نظر کاربری اراضی، توسعه کشاورزی میزان نیترات و فسفات را تا دو برابر می‌تواند افزایش دهد (Pisinaras et al., 2010).

در پژوهش دیگری، تعدادی از شیوه‌های مدیریتی و ساختاری را در آبخیز رودخانه ماکوکتا در شمال شرقی آیووا برای تعیین اثرات اقتصادی و محیط زیستی این شیوه‌ها، ارزیابی کردند (Pisinaras et al., 2010). نتایج شبه‌سازی‌های مدل نشان داد که بیشتر این شیوه‌ها شامل ترانس‌بندی، کشت نکردن زمین‌های کشاورزی، کشت بر روی منحنی میزان و میانبر مکانی<sup>۲</sup> خط تراز درون زمینی، به‌طور قابل ملاحظه‌ای تلفات ایجاد شده توسط رسوبات و تلفات مواد مغذی را کاهش خواهند داد. با این حال، وقتی که این شیوه‌ها با استفاده از کودهای شیمیایی-تجاری، ترکیب می‌شوند، کاهش رضایت بخشی را در تلفات مواد مغذی نشان می‌دهند. در بین این شیوه‌ها، ترانس‌ها بیشترین کاهش در تلفات رسوبات (بیش از ۶۰ درصد کاهش) در سطح آبخیز و بیشترین کاهش در

می‌طلبند که همان بهترین شیوه‌های مدیریت<sup>۱</sup> اجرایی هستند. بهترین شیوه‌های مدیریت (BMP)، نه تنها بر فرایندهای محیط زیست همچون، فرسایش بستر رودخانه و خاک، غلظت رسوبات و مواد مغذی در آب‌های سطحی، کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی در یک آبخیز تاثیر می‌گذارد، بلکه بر توسعه اقتصادی و اجتماعی در یک منطقه هم اثر گذارند. اجرای بهترین شیوه‌های مدیریت، به‌عنوان مثال کشت حفاظتی، مدیریت فضولات حیوانی و کودهای آلی در زمین‌های کشاورزی، اثرات منفی محیط زیستی فعالیت‌های کاربری کشاورزی را کم می‌کنند، در حالی که تولیدات کشاورزی را بالا نگه می‌دارند (Mostaghimi et al., 1997).

در آمریکا، پس از اجرایی شدن قانون ایمنی مزرعه از سال ۱۹۸۵ که یک برنامه ملی کنترل فرسایش است، Logan در سال ۱۹۹۳، در پژوهشی عنوان کرد که این قانون باید با شیوه‌های مدیریتی تکامل یابد، به این صورت که در درجه اول، روی کاهش فرسایش از طریق روش‌های حفاظتی شامل ترانس‌بندی، کشت علوفه، کشت روی خطوط تراز و شیوه‌های خاکورزی حفاظتی که باعث افزایش نفوذ و کاهش فرسایش می‌شوند، تمرکز شود و سپس، با مدیریت مصرف کود و آفت‌کش‌ها و همین‌طور افزایش راندمان آب، آلودگی منابع آبی کنترل شود. همچنین، با مطالعه شیوه‌های مدیریتی به این نتیجه رسید که هر شیوه مدیریتی به تنهایی تاثیر زیادی نداشته و بهترین نتایج با ترکیب این شیوه‌ها به‌دست می‌آید.

در سال ۱۹۹۵، در مطالعه‌ای که در حوزه آبخیز Evrotas در یونان انجام شد، پژوهشگران منابع آلودگی را شهری، صنعتی، کشاورزی و دفع ضایعات جامد شهری، عنوان کردند و افزایش ظرفیت خود پالایی پایین‌دست و سامانه ساحلی مناسب را برای کاهش آلودگی دارای اهمیت فراوان دانستند و چند اقدام مدیریتی را نیز برای کنترل آلودگی معرفی کردند که شامل کنترل منابع آلودگی سطحی (غلظت نیتروژن و فسفر در مناطق با کشت متراکم بیشتر)، استفاده از نوع و میزان کود با توجه به خاک و کشت،

<sup>2</sup> Buffers

<sup>1</sup> Best Management Practices

برای میزان کود مصرفی و دو گزینه تلفیقی، تعریف شده است.

### مواد و روش‌ها

**منطقه مورد مطالعه:** زنجان رود، یکی از مهمترین رودخانه‌های مهم در استان زنجان است که در محدوده  $36^{\circ}13'$  تا  $37^{\circ}02'$  عرض شمالی  $47^{\circ}50'$  تا  $49^{\circ}00'$  عرض شرقی، واقع شده است. این رودخانه دایمی که ۱۴۲ کیلومتر طول داشته و ارتفاع سرچشمه آن ۱۷۸۰ متر و ارتفاع ریزشگاه آن ۱۱۰۰ متر است، شیب متوسط آن ۰/۵ درصد و بخشی از حوضه رودخانه سفیدرود و دریای خزر است. بر اساس اطلاعات ایستگاه‌های هم‌دید و تبخیرسنجی در سطح حوضه، متوسط بارش سالانه  $312/1$  میلی‌متر و متوسط تبخیر سالانه ۱۶۸۳ میلی‌متر است که نشان‌دهنده تفاوت بسیار بالای میزان تبخیر نسبت به نزولات جوی است.

همچنین، متوسط دمای روزانه، کمینه و بیشینه مطلق ثبت شده در منطقه به ترتیب  $10/9$ ،  $28/6$ - و  $42$  درجه سانتی‌گراد با متوسط رطوبت نسبی ۵۴ درصد است که با اقلیم‌نمای دومارتن، اقلیم حوضه نیمه‌خشک و با اقلیم‌نمای آمبرژه، خشک سرد است.

**مدل SWAT:** این مدل، یک شبیه‌ساز هیدرولوژیکی، یک مدل زمان پیوسته و نیمه‌توزیعی مکانی با پایه فیزیکی است که به‌وسیله جف آرنولد در دهه ۹۰ میلادی برای تحقیقات کشاورزی آمریکا تهیه و از آن زمان، به‌طور پیوسته در حال توسعه بوده است (Akbari et al., 2012).

هدف اصلی مدل SWAT، شبیه‌سازی اثر شیوه‌های مختلف مدیریتی زمین (مکانی-زمانی) بر کمیت، کیفیت آب و رسوب در حوضه‌های پیچیده، با توجه به شرایط مختلف اقلیمی، کاربری اراضی و نوع خاک در درازمدت است (Ghodousi et al., 2014). در این مدل، هر حوضه به چند زیرحوضه و هر یک از زیرحوضه‌ها به چند واحد واکنش هیدرولوژیک<sup>۳</sup> که از نظر کاربری اراضی و خصوصیات خاک همگن هستند، تقسیم می‌شوند.

تلفات نیتروژن آلی و فسفر آلی (بالای ۷۰ درصد) نسبت به وضع موجود را نشان دادند. کاهش‌های پیش‌بینی شده در رسوبات برای شیوه‌های دیگر، از تقریباً ۳۰ درصد تا حدود ۴۵ درصد تغییر کرد. کاهش‌های متناظر در تلفات نیتروژن و فسفر آلی شبیه‌سازی شده، از حدود ۳۵ درصد تا حدود ۵۰ درصد تغییر کرد (Gassman et al., 2006).

مدل 'SWAT، ابزاری است برای ارزیابی کیفیت و کمیت آب و خاک حوضه رودخانه یا آبخیز است که به‌وسیله آرنولد در دهه ۹۰ برای سرویس تحقیقات کشاورزی آمریکا<sup>۲</sup> توسعه یافته است. SWAT، مدلی جامع و کامل است که شامل چهار بخش اصلی شبیه‌سازی رسوب و رواناب، پیش‌بینی بار آلودگی NPS، اصلاح اجزای مدل برای شرایط طبیعی منطقه و بررسی عدم قطعیت پارامترها و داده‌های ورودی است. همچنین، این مدل برای ارزیابی دبی جریان، اثرات بلندمدت عملیات مدیریتی بر آب، رسوب و مواد شیمیایی حاصل از فعالیت‌های کشاورزی در حوضه‌های بزرگ، توسعه یافته است. در ایالات متحده آمریکا، استفاده از مدل SWAT به‌عنوان ابزاری برای ارزیابی بسیاری از برنامه‌های حفاظتی مرحله‌ای و فشرده در سطوح حوضه‌های آبخیز بزرگ ارائه شده است (Arnold et al., 1998). (Abbaspour et al., 2007)، برای شبیه‌سازی فرایندهایی که روی کیفیت آب، رسوب و چرخه عناصر غذایی در حوضه رودخانه تور موثرند، از مدل SWAT استفاده کردند. نتایج نشان داد که شبیه‌سازی رواناب و فسفات بسیار خوب و شبیه‌سازی رسوب و فسفر نسبتاً خوب بوده است (Abbaspour et al., 2007). در این پژوهش، چرخه انتقال فسفات در حوزه آبخیز زنجان‌رود با استفاده از مدل SWAT، شبیه‌سازی شده است. برای تحلیل حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی از الگوریتم SUFI2 در نرم‌افزار SWAT-CUP و مقادیر اندازه‌گیری شده شدت جریان متوسط ماهانه، در ایستگاه آب‌سنجی سرچم، بین سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۰ استفاده شد. همچنین، سه گزینه برای شیوه آبیاری، سه گزینه

<sup>1</sup> Soil and Water Assessment Tool

<sup>2</sup> United States Department of Agriculture–Agricultural Research Service (USDA–ARS)

<sup>3</sup> Hydrologic Response Unit (HRU)

**مدلسازی هیدرولوژیکی در SWAT:** به‌طور کلی براساس فرمت داده‌ها، اطلاعات مورد نیاز برای شبیه‌سازی به سه دسته تقسیم می‌شوند. اولین لایه شامل لایه اطلاعات رقومی ارتفاعی، لایه شبکه آبراهه‌ها، نقشه کاربری اراضی و نقشه خاکشناسی و دومین لایه شامل اطلاعات هواشناسی، خاکشناسی، مشخصات رودخانه‌ها، پارامترهای موثر در تعیین رواناب سطحی و پارامترهای موثر در شبیه‌سازی فرسایش است.

سومین لایه شامل داده‌های هواشناسی روزانه شامل بارش، درجه حرارت کمینه، بیشینه و روزانه، متوسط، انحراف معیار و ضریب چولگی مقدار بارش، احتمال یک روز تر به دنبال یک روز خشک، متوسط درجه شبنم و متوسط سرعت باد برای هر ماه است (Neitsch et al., 2005). در شکل ۲، دیاگرام مدلسازی هیدرولوژیکی در SWAT ارائه شده است. مشخصات ایستگاه‌های هم‌دید و آب‌سنجی که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفتند، مطابق جدول ۱، است.

جدول ۱- مشخصات و موقعیت ایستگاه‌های هم‌دید و آب‌سنجی مورد استفاده

Table 1. Specifications and location of used synoptic and hydrometric stations

Station name	Station type	Latitude	Longitude	Altitude
Khoram Dareh	Synoptic	36 11 N	49 11 E	1575
Khodabandeh	Synoptic	36 07 N	48 35 E	1887
Zanjan	Synoptic	36 41 N	48 29 E	1663
Sarcham	Hydrometric	37 07 N	47 53 E	1150

بر اساس اطلاعات ورودی، حوزه آبخیز زنجان‌رود به ۱۹ زیرحوضه و ۲۳۸ واحد پاسخ هیدرولوژیکی تقسیم شد و خروجی حوضه در محل ایستگاه آب‌سنجی سرچم و زیرحوضه شماره ۱، قرار دارد که موقعیت آن‌ها در شکل ۳، ارائه شده است.

در ابتدا، آب موجود در خاک، رواناب سطحی، چرخه عناصر غذایی، رسوب، رشد گیاهان و روش‌های مدیریتی برای هر واحد واکنش هیدرولوژیکی، و سپس، برای هر زیرحوضه به‌صورت متوسط وزنی، محاسبه می‌شود. در مدل SWAT، ابتدا از روی مدل رقومی ارتفاعی<sup>۱</sup>، حوزه آبخیز اصلی به تعدادی زیرحوضه تقسیم می‌شود.

سپس، بر مبنای نقشه‌های خاک و کاربری اراضی زیرحوضه‌ها نیز به واحدهای کوچک‌تری تقسیم می‌شوند که هر کدام از این واحدها یک HRU است. همان‌گونه که در شکل ۱، نشان داده شده است، چرخه هیدرولوژی که به‌وسیله SWAT شبیه‌سازی می‌شود، بر پایه معادله بیلان آبی (رابطه ۱) است.

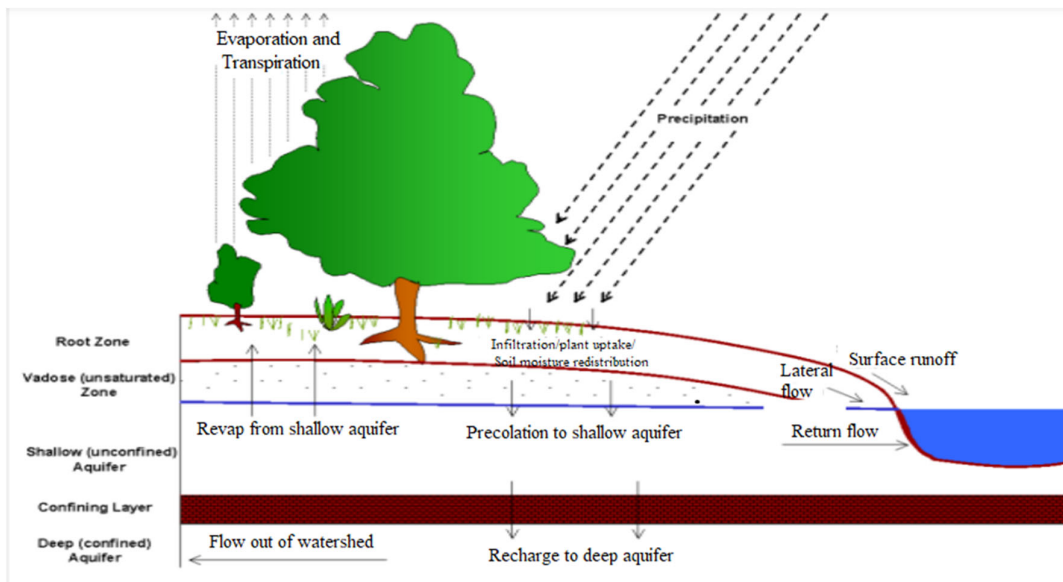
$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - W_{seep} - E_a - Q_{gw}) \quad (1)$$

که در آن،  $SW_t$  مقدار نهایی آب در خاک (میلی‌متر)،  $SW_0$  مقدار اولیه آب در خاک (میلی‌متر)،  $R_{day}$  مقدار بارندگی در روز نام (میلی‌متر)،  $Q_{surf}$  مقدار رواناب سطحی در روز نام (میلی‌متر)،  $E_a$  مقدار تبخیر و تعرق در روز نام (میلی‌متر)،  $W_{seep}$  مقدار آبی که از پروفیل خاک به ناحیه غی اشباع در روز نام (میلی‌متر) و  $Q_{gw}$  مقدار جریان برگشتی در روز نام (میلی‌متر) است.

در این مدل، برآورد رواناب سطحی با استفاده از یکی از روش‌های CN و یا گرین-آمیت، پیش‌بینی بیشینه نرخ رواناب با روش استدلالی اصلاح‌شده، محاسبه تبخیر و تعرق به یکی از سه روش پنمن-مانتیث، پریستلی-تیلور و یا هارگریوز و روندیابی جریان در کانال، به روش ماسکینگهام و یا روش ذخیره متغیر، انجام می‌شود (Neitsch et al., 2009; Lei et al., 2012; Akbari et al., 2012; Zahabion et al., 2010).

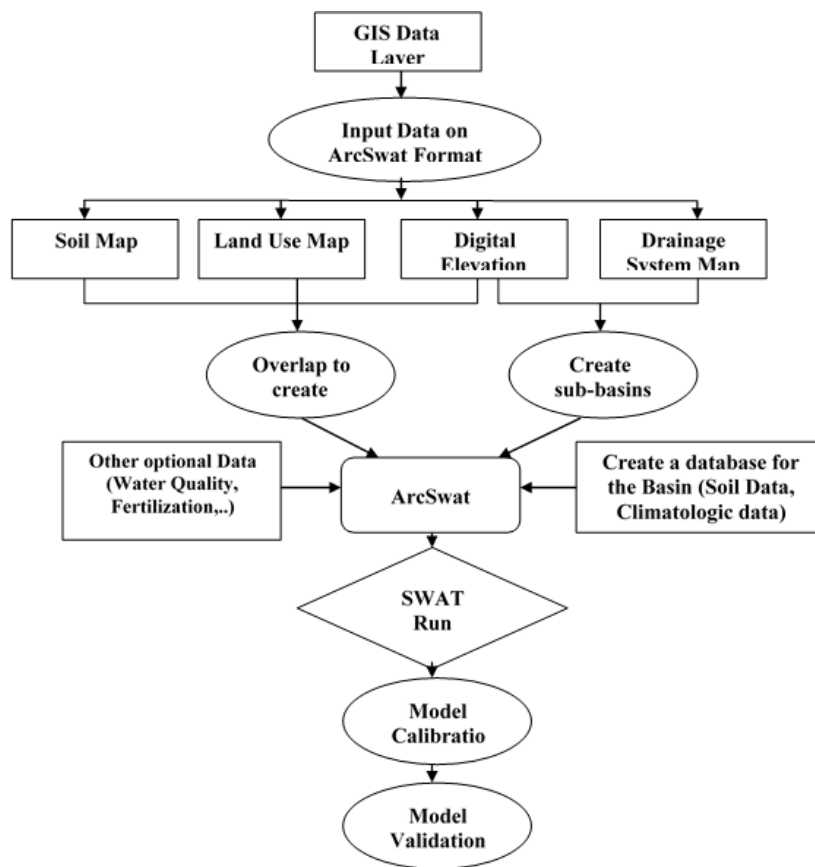
رواناب، رسوب و بارگذاری مواد مغذی از هر واحد پاسخ هیدرولوژیکی، با استفاده از داده‌های ورودی در مورد آب و هوا، ویژگی‌های خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی و شیوه‌های مدیریت زمین، به‌طور جداگانه محاسبه و سپس، کل بارگذاری از زیرحوضه از طریق جمع واحدها محاسبه می‌شود (Pasandiadeh Fard et al., 2012, Wu and Chen, 2013).

<sup>1</sup> Digital Elevation Model (DEM)



شکل ۱- چرخه هیدرولوژیکی در مدل SWAT (Akbari et al., 2012)

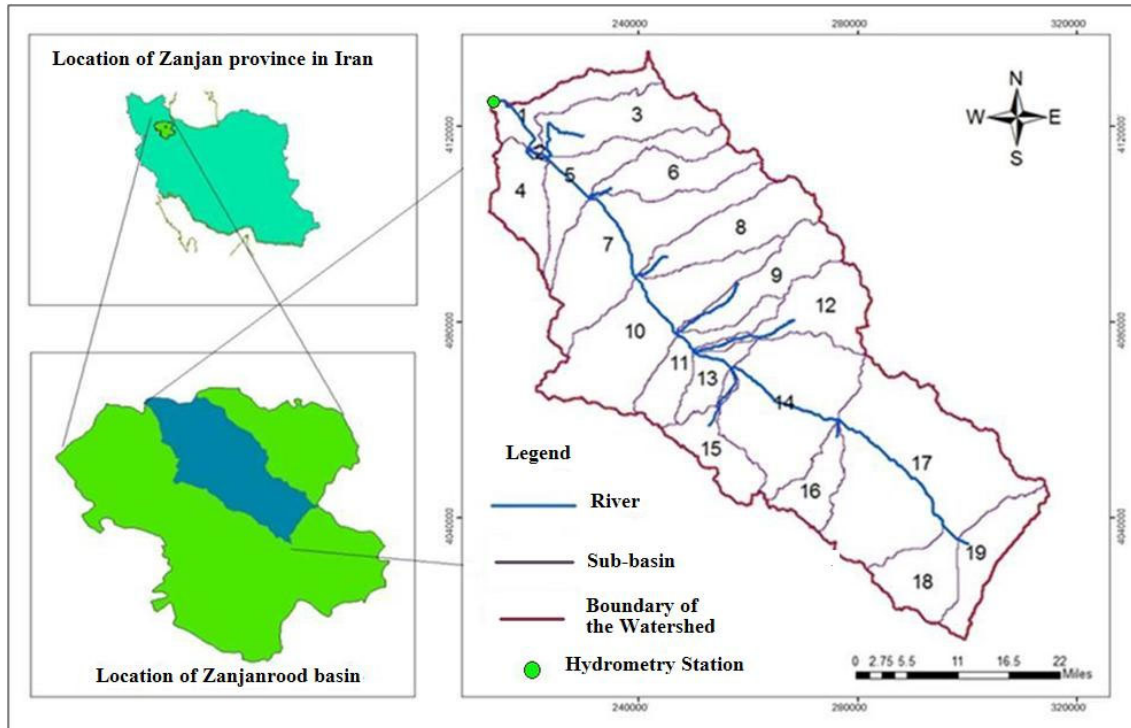
Fig. 1. Hydrological cycle in SWAT model (Akbari et al., 2012)



شکل ۲- دیاگرام مدلسازی هیدرولوژیکی در SWAT

Fig. 2. Hydrological modeling diagram in SWAT





شکل ۳- موقعیت حوزه آبخیز زنجان‌رود و زیرحوضه‌های آن در مدل SWAT

Fig. 3. Location of Zanjantrood Catchment and its sub-basins in SWAT model

نظر گرفته شده است. در گزینه ۲، فرض شده که ۵۰ درصد مساحت زمین‌های زراعی آبی به صورت ثقلی و ۵۰ درصد آن به صورت تحت فشار آبیاری شود. در این صورت، بازده آبیاری حوضه ۴۹/۵ درصد در نظر گرفته شده است. در گزینه ۳، با فرض این که کل زمین‌های زراعی به صورت تحت فشار آبیاری شود، بازده ۶۲ درصد به کل مدیریت‌های آبیاری اعمال شده است.

مقادیر کود اوره مصرفی، در زمین‌های زراعی آبی در جدول ۲، برای الگوی کشت غالب حوضه زنجان رود، ارائه شده است که در آن، کود اوره در دو مرحله ابتدا و اواسط فصل کشت در بخش مدیریت‌های زراعی اعمال شده است. برای تعیین اثرات کوددهی نیز مانند آبیاری سه گزینه تعریف شده است. در گزینه ۴، مقادیر کوددهی برابر با صفر در نظر گرفته شده است.

در گزینه ۵، تمامی مقادیر کوددهی در وضع موجود با تغییر الگوی کشت و ارقام گیاهی، به ۵۰ درصد کاهش یافته است. در گزینه ۶، تمامی مقادیر کوددهی در وضع موجود با تغییر الگوی کشت و ارقام گیاهی ۵۰ درصد افزایش یافته است. این گزینه به عنوان بهترین شرایط در نظر گرفته شده است و شامل

**گزینه‌های شبیه‌سازی:** برای تعیین اثر افزایش سطح آبیاری تحت فشار، در میزان فسفات ورودی از زمین‌های کشاورزی به رودخانه زنجان‌رود، تنها راه، اعمال تغییرات در راندمان آبیاری است. در این پژوهش، راندمان آبیاری برای آبیاری سطحی ۳۷ درصد و برای آبیاری تحت فشار ۶۲ درصد در نظر گرفته شده است (Agriculture of Zanjantrood Province, 2013).

طبق آمارهای دریافتی از سازمان جهاد کشاورزی استان زنجان، مساحت زمین‌های کشاورزی زراعی تحت آبیاری در حوضه زنجان‌رود، ۴۷۷۶۳ هکتار است که از این مقدار ۶۳۸۴ هکتار معادل ۱۳/۳ درصد، تحت آبیاری تحت فشار قرار دارد و مابقی اراضی معادل ۸۶/۷ درصد، به صورت ثقلی آبیاری می‌شوند و به عنوان گزینه اصلی که نشان‌دهنده وضع موجود است، شبیه‌سازی شده است. همچنین، سه گزینه برای بررسی اثرات روش آبیاری و بازده آبیاری در نظر گرفته شده است که در گزینه ۱، فرض شد که کل زمین‌های کشاورزی آبی به صورت ثقلی آبیاری می‌شوند. بنابراین، بازده آبیاری حوضه برابر ۳۷ درصد در

از اطلاعات میزان فسفات اندازه‌گیری شده در ایستگاه هیدرومتری سرچم، بین سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۳ که شامل ۱۵۵ نمونه بود، در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل استفاده شده است.

ترکیب دو گزینه ۱۰۰ درصد آبیاری تحت فشار و میزان کوددهی صفر است. در این گزینه با افزایش ۵۰ درصدی میزان کود و آبیاری، کل اراضی زراعی آبی به صورت سطحی شبیه‌سازی شده است.

جدول ۲- مقادیر کود فسفات مصرفی در زمین‌های زراعی آبی برای الگوی کشت غالب حوضه زنجان‌رود

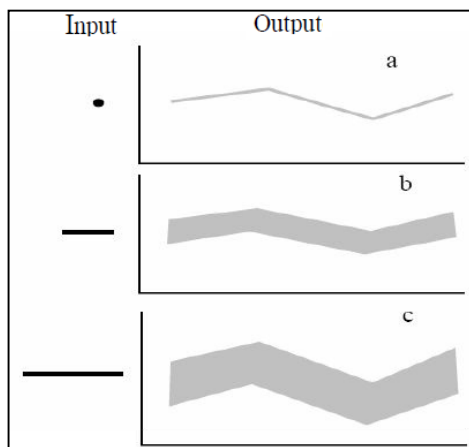
Table 2. The amounts of phosphate fertilizers used in irrigated fields for the dominant cultivation pattern of Zanjanroud Watershed

Crop type	Cropping percentage	Planting date	Harvest date	Phosphate fertilizer application (kg)	Annual irrigation depth (mm)	Irrigation interval (day)
Alfalfa	47	April 4	September 21	150	1790	10
Wheat	28	October 7	July 22	150	890	10
Onion	13	March 25	August 6	150	910	6
Barley	12	September 23	June 20	150	570	14

برنامه SUFI2 و انتخاب تعداد ۲۰۰ شبیه‌سازی، تحلیل حساسیت و عدم قطعیت، بر روی آن‌ها انجام گرفته است.

## نتایج و بحث

**واسنجی و تحلیل عدم قطعیت:** واسنجی مدل SWAT با استفاده از نرم‌افزار SWAT-CUP، انجام می‌شود که به‌وسیله (2012) Abbaspour توسعه یافته است و دارای روش‌های متنوعی از جمله الگوریتم SUFI2 برای واسنجی پارامترها است. روش SUFI2 در میان سایر روش‌های موجود در نرم‌افزار، دارای سرعت بیشتری در محاسبات بوده، علاوه بر این عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌های موجود در تعیین عدم قطعیت در بسیاری از مطالعات داشته است. الگوریتم SUFI2، در واقع معکوس مدل SWAT عمل می‌کند، به این معنی که با گرفتن داده‌های مشاهده‌ای و همچنین، محدوده مجاز پارامترهای مدل SWAT که در واسنجی کردن مدل نسبت به حوضه مطالعاتی نقش دارند، میزان بهینه پارامترهای مذکور را برآورد می‌کند.



شکل ۴- مفهوم عدم قطعیت در الگوریتم SUFI2  
Fig. 4. The concept of uncertainty in SUFI2 algorithm

به‌منظور تحلیل عدم قطعیت، از شاخص‌های  $p$ -factor و  $r$ -factor استفاده شده است که  $p$ -factor بیانگر درصد داده‌های اندازه‌گیری شده است که درون نوار عدم قطعیت ۹۵ درصد (95ppu) قرار می‌گیرد. معیار 95ppu با محاسبه مقادیر متناظر، احتمال ۲/۵ درصد به‌عنوان حد پایین و ۹۷/۵ درصد به‌عنوان حد بالا، با استفاده از نمونه‌برداری به روش لاتین هاپرکیوپ و حذف پنج درصدی شبیه‌سازی‌های بسیار بد، به‌دست می‌آید و نزدیک بودن این عدد به یک نشان‌دهنده نتیجه بهتر است.  $r$ -factor برابر با ضخامت نوار 95ppu، تقسیم بر انحراف معیار داده‌های اندازه‌گیری شده است که هر چه به صفر نزدیک‌تر

در شکل ۴، مفهوم عدم قطعیت الگوریتم SUFI2 آورده شده است که نشان می‌دهد، پارامتر با مقدار واحد باعث ایجاد یک نتیجه واحد برای مدل می‌شود (شکل ۴a) در صورتی که انتشار عدم قطعیت در پارامتر باعث ایجاد ناحیه‌ای از جواب می‌شود (شکل ۴b). هنگامی که عدم قطعیت پارامترهای ورودی افزایش می‌یابد، عدم قطعیت خروجی نیز افزایش می‌یابد (شکل ۴c).

بر اساس بررسی مطالعات مختلف صورت گرفته، ۲۶ پارامتر بر رواناب موثر هستند که در این پژوهش نیز برای شبیه‌سازی اولیه انتخاب شدند. با استفاده از

متغیر است. بهترین مقدار آن یک است و در صورتی که میزان آن بیشتر از ۰/۵ باشد، نشان‌دهنده این است که شبه‌سازی به‌وسیله مدل خوب است. ضریب تعیین  $R^2$ ، نسبت پراکندگی بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد و مقدار آن بین صفر تا یک متغیر است. چنانچه مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده با هم برابر باشند، مقدار  $R^2$  برابر یک است.

$$NS = 1 - \frac{\sum_i (Q_m - Q_s)_i^2}{\sum_i (Q_m - \bar{Q}_m)^2} \quad (2)$$

$$R^2 = \frac{I \sum_i (Q_m - \bar{Q}_m) \cdot (Q_s - \bar{Q}_s) I^2}{\sum_i (Q_m - \bar{Q}_m)^2 \cdot \sum_i (Q_s - \bar{Q}_s)^2} \quad (3)$$

که در آن‌ها،  $Q_m$  دبی مشاهده‌ای (متر مکعب بر ثانیه) و  $Q_s$  دبی محاسباتی (متر مکعب بر ثانیه) در طول دوره شبه‌سازی است. با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده شدت جریان متوسط ماهانه، بین سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۰، در ایستگاه آب‌سنجی سرچم و انتخاب ۲۶ پارامتر حساس، اقدام به واسنجی مدل شد.

باشد، نشان‌دهنده شبه‌سازی مناسب‌تر است (Abbaspour, 2011). نتایج تحلیل حساسیت و واسنجی پارامترهای مدل SWAT در جدول ۳، نشان داده شده است. شماره منحنی SCS و چگالی توده خاک مرطوب در هر لایه، حساس‌ترین پارامتر برای دوره واسنجی است.

**واسنجی و اعتبارسنجی مدل:** ارزیابی نتایج واسنجی به‌وسیله نه تابع هدف با نام‌های mult، RSR و PBIAS، SSQR،  $Br^2$ ، NS، Chi2،  $R^2$ ، SUM صورت می‌گیرد. در این پژوهش، برای تحلیل کیفیت نتایج مدل از شاخص‌های p-factor و r-factor و دو شاخص ضریب تعیین ( $R^2$ ) و ضریب نش-ساتکلیف (NS) (رابطه‌های ۲ و ۳) استفاده و نتایج در جدول ۴ و شکل ۵ ارائه شده است. NS، ضریبی است که اختلاف نسبی بین مقادیر مشاهده‌ای و شبه‌سازی شده را نشان می‌دهد. مقدار این ضریب، بین یک تا منفی بینهایت

جدول ۳- نتایج تحلیل حساسیت و واسنجی پارامترهای مدل SWAT

Table 3. Results of sensitivity analysis and calibration of SWAT model parameters

Rank	Parameter	Definition	Initial range	Final value	Optimum value	p-factor	r-factor
1	R_CN2.mgt	SCS curve number	-0.3-0.3	0.04-0.12	0.05	0	-13.38
2	R_SOL_BD(.,).sol	Wet bulk density in each layer	-0.25-0.5	-0.25_0.15	-0.23	0	-3
3	V_ESCO.hru	Correction factor of soil evaporation	0.0-1.1	0.11-0.38	0.37	0.05	-1.98
4	V_USLE_P.mgt	Coefficient factor of land use equation	0.0-1.0	0.51-0.62	0.55	0.06	-1.88
5	V_RCHRG_DP.gw	Lower layer penetration coefficient	0.0-1.0	0.0-0.06	0.02	0.07	1.85
6	R_SOL_AWC(.,).sol	Water in any soil layer	-0.3-0.3	-0.4_-0.3	-0.4	0.07	-1.81
7	V_ALPHA_BN.K.rte	Alpha coefficient stream base to save	0.0-1.0	0.41-0.57	0.54	0.11	-1.63
8	R_SOL_ALB(.,).sol	Soil albedo coefficient	-0.3-0.4	0.30-0.43	0.38	0.14	1.5
9	V_REVAPMN.gw	Depth of water threshold in groundwater table	0-500	158-200	171.83	0.18	1.35
10	V_CH_N2.rte	Manning coefficient for the main channel	-0.01-0.3	0.16-0.23	0.18	0.2	1.28
11	R_SOL_K(.,).sol	Hydraulic conductivity of saturated soil	-0.3-0.3	0.11-0.38	0.3	0.26	-1.13
12	V_OV_N.hru	Manning coefficient for flood plains	0.01-30	26-30	27.59	0.33	-0.98
13	R_USLE_K(.,).sol	Soil erosion coefficient	0.0-0.7	0.16-0.27	0.18	0.4	0.84
14	V_SMFMN.bsn	Minimum snow melt factor during the year	0-20	14-18	16.03	0.4	-0.84
15	V_SFTMP.bsn	Snow threshold temperature	-20-20	-1.8-6.8	4.41	0.47	0.73
16	V_GW_REVAP.gw	Groundwater coefficient	0.02-0.2	0.10-0.13	0.12	0.48	-0.7
17	V_ALPHA_BF.gw	Alpha factor in returning the mainstream flow to the main stream	0.0-1.0	0.51-0.64	0.54	0.49	0.7
18	V_SHALLST.gw	Primary water depth in the groundwater table	0-5000	1190-1800	1737.69	0.5	-0.68
19	V_TIMP.bsn	Late snow temperature	0.0-1.0	0.85-0.99	0.87	0.52	0.64
20	V_SMFEMX.bsn	Maximum snow melt factor during the year	0-20	0.15-2.4	1.59	0.65	0.46
21	V_CANMX.hru	Maximum surface retention	0-100	40.5-57.1	45.42	0.85	0.19

ادامه جدول ۳

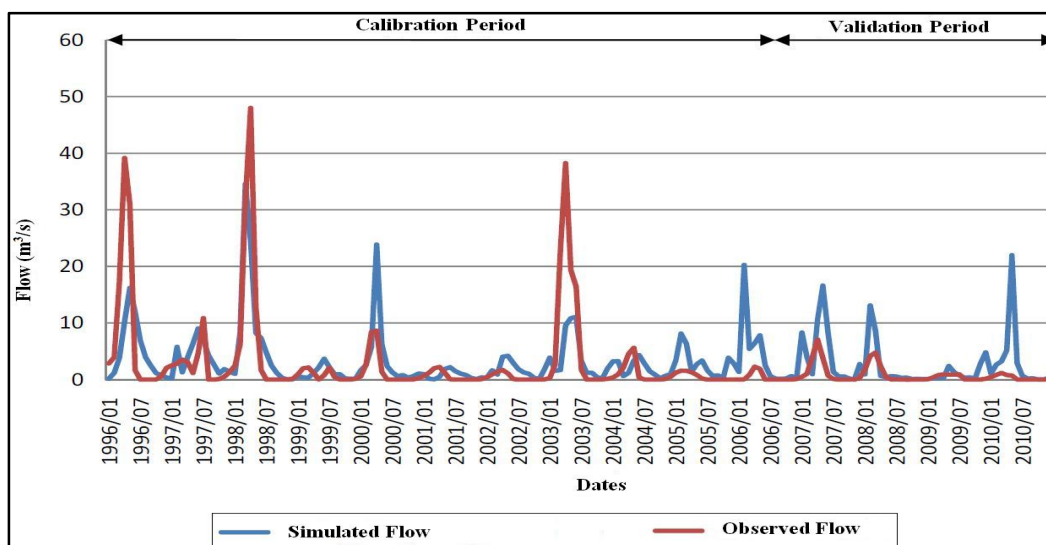
Table 3 Continued

22	V_CH_K2.rte	Hydraulic conductivity in the main channel	-0.01-500	159-220	219.26	0.86	-0.18
23	V_LAT_TTIME.hru	Flow time on sub-flow channel	0-180	135-176	136.73	0.89	0.14
24	V_SLSUBBSN.hru	The average length of slope	10-150	93-112	103.68	0.94	-0.08
25	V_SPCON.bsn	Maximum linear parameter of returned sediment to the channel	0.0-0.0	0.01-0.01	0.01	0.96	-0.05
26	V_SPEXP.bsn	Maximum exponential parameter of returned sediment to the channel	1.0-1.5	0.28-0.79	0.76	0.97	0.04

جدول ۴- شاخص‌های ارزیابی واسنجی و اعتبارسنجی

Table 4. Evaluation and validation indicators

Parameter	R <sup>2</sup>	NS	r-factor	p-factor
Calibration	0.83	0.53	0.27	0.11
Validation	0.73	0.53	0.60	0.18



شکل ۵- مقادیر دبی مشاهده‌ای ایستگاه سرچم و شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل SWAT

Fig. 5. Amount between observed discharge of Sarchem station and simulated by SWAT model

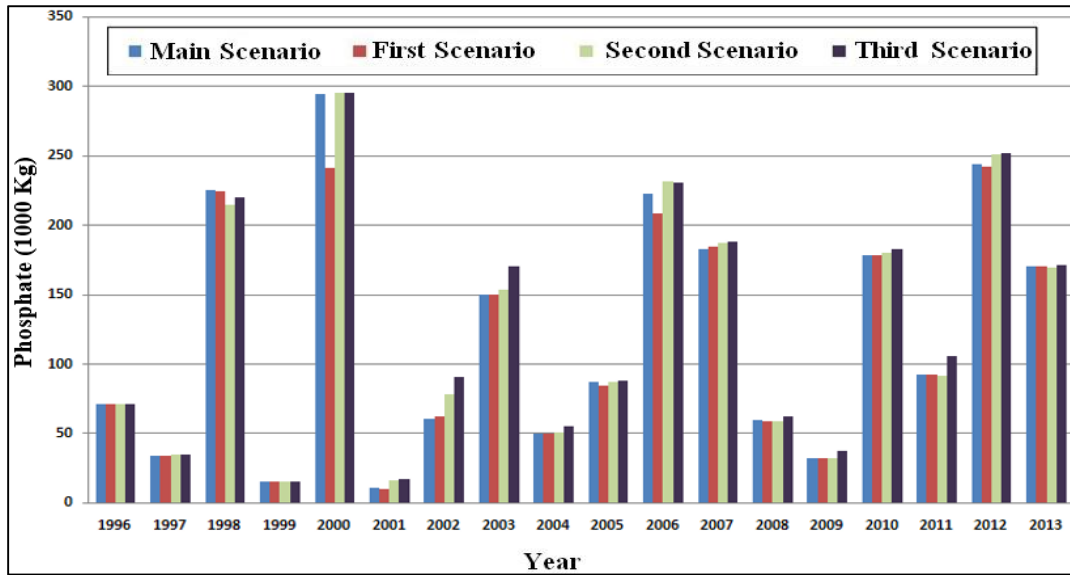
نتایج حاصل از شبیه‌سازی چرخه فسفات، در گزینه‌های میزان کوددهی نشان داد که میزان فسفات خروجی از حوضه نسبت به گزینه اصلی که مربوط به شرایط موجود است، در گزینه ۴، ۵ و ۶ به ترتیب ۴۲/۹ درصد کاهش، ۱۹/۲ درصد کاهش و ۱۷/۷ درصد افزایش مشاهده می‌شود. در شکل ۷، مقایسه تغییرات فسفات خروجی از حوضه زنجان رود با تغییر دادن میزان کوددهی در طی دوره شبیه‌سازی از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۳، در مقایسه با وضعیت موجود ارائه شده است. بر همین مبنا، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که با کاهش مقادیر کوددهی و جلوگیری از کوددهی بی‌رویه به‌وسیله کشاورزان به میزان زیادی می‌توان مانع

نتایج حاصل از شبیه‌سازی چرخه فسفات، در گزینه‌های شیوه آبیاری نشان داد که میزان فسفات خروجی از حوضه نسبت به گزینه اصلی که مربوط به شرایط موجود است، در گزینه ۱، به میزان ۳/۱۹ درصد کاهش، در گزینه ۲، به میزان ۱/۷۴ درصد افزایش و در گزینه ۳، به میزان ۴/۸۵ درصد، افزایش مشاهده می‌شود. در شکل ۶، مقایسه تغییرات فسفات خروجی از حوضه با تغییر دادن شیوه آبیاری در طی دوره شبیه‌سازی از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۳، در مقایسه با وضعیت موجود ارائه شده است. لذا، با تغییر شیوه آبیاری سطحی به تحت فشار، تغییر چشمگیری در میانگین میزان فسفات خروجی از سطح حوضه زنجان رود ایجاد نمی‌شود.

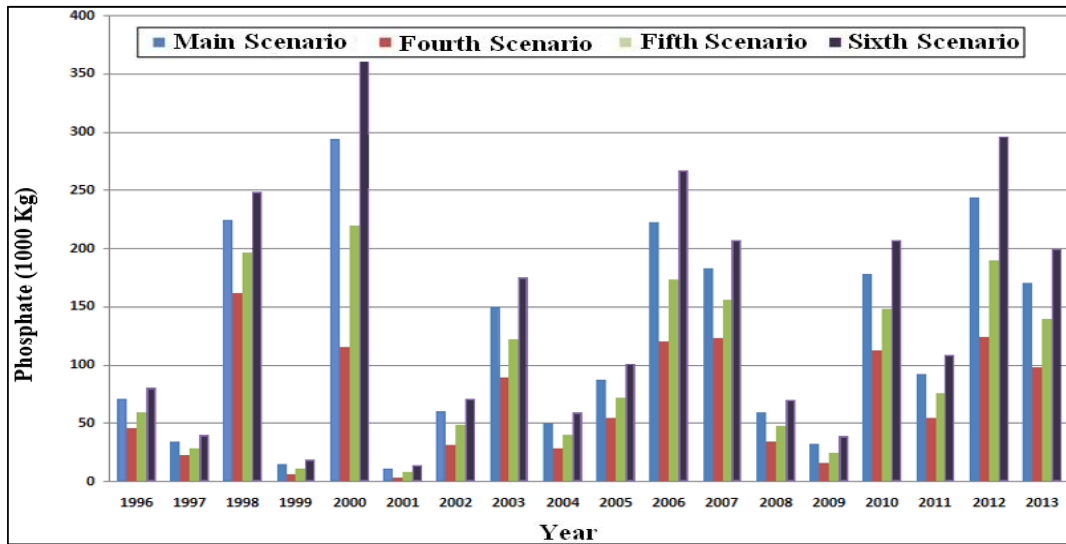
۱۳/۲ درصد افزایش داشته است. در شکل ۸، مقایسه تغییرات فسفات خروجی از حوضه زنجان‌رود با تغییر دادن هم‌زمان شیوه آبیاری و میزان کود، ارائه شده است. با مقایسه نتایج این گزینه‌ها با گزینه‌های آبیاری و کوددهی می‌توان نتیجه گرفت که تنها تغییر مقادیر کود، بر میزان مواد مغذی خروجی اثرگذار است و حتی در شرایط تلفیقی نیز اثر آبیاری ناچیز خواهد بود.

آلودگی منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی در حوضه زنجان‌رود شد.

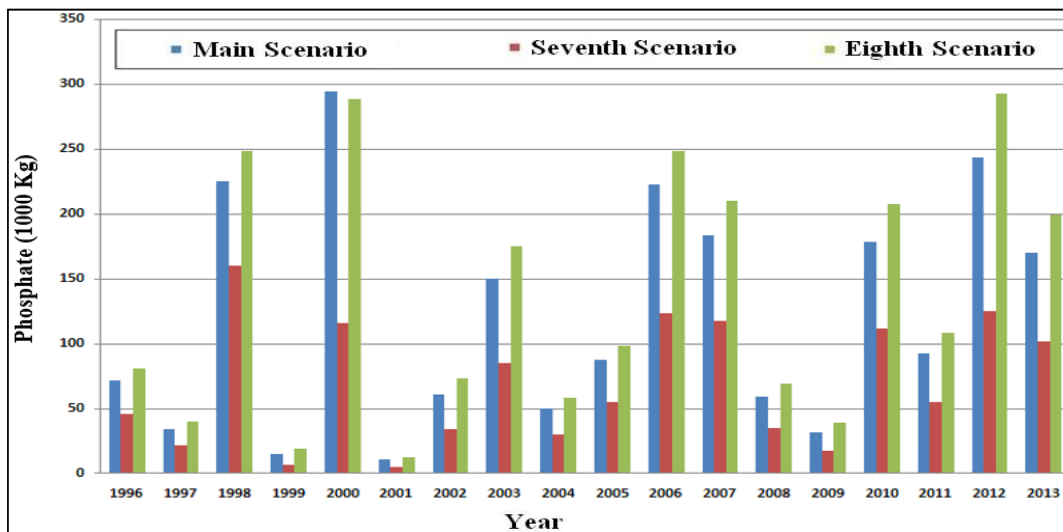
در گزینه‌های تلفیقی در گزینه ۷، شامل ۱۰۰ درصد آبیاری تحت فشار و میزان کوددهی صفر، میزان فسفات وارد شده به منابع آب سطحی ۴۲/۹ درصد کاهش و در گزینه ۸، شامل افزایش ۵۰ درصدی میزان کود و آبیاری کل اراضی زراعی آبی به صورت سطحی، میزان فسفات وارد شده به رودخانه زنجان‌رود



شکل ۶- تغییرات فسفات خروجی از حوضه زنجان‌رود در گزینه‌های شیوه آبیاری در طی دوره شبیه‌سازی از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۳  
 Fig. 6. Changes in phosphate output from Zanjanroud Basin in irrigation method options during the simulation period from 1996 to 2013



شکل ۷- تغییرات فسفات خروجی از حوضه زنجان‌رود در گزینه‌های کوددهی در طی دوره شبیه‌سازی از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۳  
 Fig. 7. Changes in phosphate output from Zanjanroud basin in fertilization options during the simulation period from 1996 to 2013



شکل ۸- تغییرات فسفات خروجی از حوضه زنجانرود با تغییر دادن هم‌زمان شیوه آبیاری و میزان کود مصرفی

Fig. 8. Changes in phosphate output from Zanjanroud basin by changing the irrigation method and the amount of fertilizer used at the same time

### نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل SWAT و توانایی آن در شبیه‌سازی رواناب، حرکت فسفات از زمین‌های کشاورزی به سمت رودخانه به همراه عدم قطعیت تحلیل‌ها و پارامترهای موثر در شبیه‌سازی بود که با نتایج تحقیقات Kang et al., (2006), Abbaspour et al., (2007), Ballantine et al., و Schilling and Wolter (2009) (2009)، تطابق دارد. یکی از مشکلات و محدودیت‌ها در این پژوهش، کمبود اطلاعات میدانی و دقیق در خصوص میزان مصرف کود فسفاته، به‌وسیله کشاورزان در سطح حوزه آبخیز رودخانه زنجانرود بود.

پیشچیدگی‌های خاص حوزه‌های آبخیز با زمین‌های کشاورزی وسیع و الگوهای مختلف کشت در سطح آن و تنوع بسیار زیاد متغیرهای تاثیرگذار در حرکت آلودگی‌های غیرنقطه‌ای به سوی منابع آب سطحی، موجب شد که رضایتمندی از نتایج مدل SWAT در مرحله واسنجی در خروجی حوزه آبخیز زنجانرود با مقادیر  $NS=0.53$  و  $R^2=0.83$  حاصل شود که با نتایج تحقیقات Moriasi and Arnold (2007) برای آماره‌های ارزیابی ضریب تبیین و نش-ساتکلیف حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی مدل، تطبیق دارد.

همچنین، اعتبارسنجی مدل SWAT نیز نتایج مشابهی به همراه داشت. پس از اعتبارسنجی

هیدرولوژیکی، مدل SWAT برای شبیه‌سازی میزان فسفات ورودی از زمین‌های کشاورزی به رودخانه زنجانرود، گزینه‌های مختلف سامانه‌های آبیاری تحت فشار و ثقلی و افزایش و کاهش میزان کود فسفاته مصرفی به‌وسیله کشاورزان، مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج نشان داد که با تغییر شیوه آبیاری سطحی به تحت فشار، تغییر چشمگیری در میانگین میزان فسفات خروجی از سطح حوضه ایجاد نمی‌شود، چرا که جابه‌جایی فسفات عمدتاً به شکل متصل به رسوبات صورت می‌گیرد. در مطالعات Turner and Rabalais (2003) نیز ذکر شده است که روند مشابهی بین تغییرات بار فسفات ورودی به رودخانه و میزان بار معلق رسوب مشاهده شده است. همچنین، با کاهش مقادیر کوددهی و جلوگیری از کوددهی بی‌رویه به وسیله کشاورزان، به میزان زیادی می‌توان مانع آلودگی منابع آب‌های سطحی شد.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان، از شرکت آب منطقه‌ای زنجان بابت همکاری صمیمانه آن‌ها تشکر می‌نمایند.

### تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافی وجود ندارد و این مساله مورد تأیید همه نویسندگان است.

## منابع مورد استفاده

- Abbaspour, K.C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J., Srinivasan, R., 2007. Modeling of hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur Watershed using SWAT. *J. Hydrol.* 333, 413-430.
- Abbaspour, K.C.J., 2011. User manual for SWAT-CUP4. SWAT calibration and uncertainty analysis programs. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Duebendorf, Switzerland.
- Agriculture Organization of Zanjan Province. 2013. Report on the efficiency of irrigation systems in Zanjan Province. Agriculture Organization of Zanjan Province, 1-174 (in Persian).
- Akbari, M., Bahremand, A., Najafi Nejad, A., 2012. Sensitivity analysis of parameters in SWAT model in Chehelchay Watershed in Guilan Province. *J. Agric. Sci. Tec. Water Soil Sci.* 67(18), 279-287 (in Persian).
- Asadi, M., 2005. Non-point water pollution, problems and perspectives. Proceedings of Second National Conference on Watershed Management and Water and Soil Management, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran (in Persian)
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Mutiah, S., Williams, J.R., 1998. Large area hydrologic modeling and assessment. Part I Model development. *J. Am. Water Resour.* 34(1), 73-89
- Bagherzadeh, A., Pirouz, B., Sabeti Raftar, A., 2009. Effects of urban, industrial and agricultural pollutants on water quality in Goharood River in Rasht County, Guilan Province. Proceedings of 8th International River Engineering Seminar, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran (in Persian)
- Ballantine, D., Walling, D.E., Leeks, G.J., 2009. Mobilization and transport of sediment-associated phosphorus by surface runoff. *Wat. Air and Soil Poll.* 196, 311-320.
- Gassman, P.W., Osei, E., Saleh, A., Rodecap, J., Norvell, S., Williams, J., 2006. Alternative practices for sediment and nutrient loss control on livestock farms in northeast Iowa. *Agric. Ecosyst. Environ.* 117, 135-144.
- Ghodousi, M., Delavar, M., Morid, S., 2014. The effect of land use on the hydrology of Aji Chai Basin in the Urumieh Lake, Iran. *J. Water and Wine Res.* 45 (2), 123-133 (in Persian).
- Kang, M.S., Park, S.W., Lee, J.J., Yoo, K.H., 2006. Applying SWAT for TMDL programs to a small watershed containing rice paddy field. *Agric. Water Manag.* 79, 72-92.
- Lee, M.S., Park, G.A., Park, M.J., Park, J.Y., Lee, J.W., Kim, S.J., 2010. Evaluation of non-point source pollution reduction by applying best management practices using a SWAT model and quickbird high resolution satellite imagery. *J. Environ. Sci.* 22(6), 826-833.
- Lei, W., Yu, U., Xia, T., Long, L., Jin-Song, G., 2012. Impacts of climate and land-use changes on the migration of non-point source nitrogen and phosphorus during rainfall-runoff in the Jialing River Watershed, China. *J. Hydrol.* 475, 26-41.
- Logan, T.J., 1993. Agricultural best management practices for water pollution control: current issues. *Agric. Ecosyst. Environ.* 46, 223-231.
- Lucy, O., Andrew, W., 2009. Controlling nitrate pollution: an integrated approach. *Land Use Policy* 26, 799-808.
- Markantonatos, P.G., Bacalis, N.C., Angelidis, M.O., 1995. Pollution control in the catchment basin of the river Evrotas, Greece. *Water Sci. Technol.* 32, 247-255.
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., 2007. Model evaluation guideline for systematic quantification of accuracy in watershed simulation. *J. T. ASABE* 50(3), 885-900.
- Mostaghimi, S., Park, S.W., Cooke, R.A., Wang, S.Y., 1997. Assessment of management alternatives on a small agricultural watershed. *Elsevier sci.* 31(8), 1867-1877.
- Naramngam, S., Tong, S.T.Y., 2013. Environmental and economic implications of various conservative agricultural practices in the upper little Miami River Basin. *Agric. Water Manag.* 119, 65-79.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., 2005. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2005. Soil and Water Research Laboratory-Agricultural Research Service, Blackland Research Center-Texas Water Resources Institute, Technical Report No.406.
- Pasandiadeh Fard, Z., Salman Mahini, A., Mirkarimi, H., 2012. Assessing river water quality improvement by best practices of management (BMP) and modeling techniques. Proceedings of Second Conference on Environmental Planning and Management, Tehran University, Tehran (in Persian)
- Pisinaras, V., Petalas, C., Gikas, G.D., Gemitzi, A., Tsihrintzis, V.A., 2010. Hydrological and water quality modeling in a medium-sized basin using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). *Desalination* 250, 274-286.
- Schilling, K.E., Wolter, C.F., 2009. Modeling nitrate-nitrogen load reduction strategies for the Des Moines River, Iowa Using SWAT. *J. Environ. Manage.* 44(4), 671-682.

- Turner, R.E., Rabalais, N.N., 2003. Linking landscape and water quality in the Mississippi River Basin for 200 years. *J. Biosci.* 53(6), 563-572.
- Wu, Y., Chen, J., 2013. Investigating the effects of point source and nonpoint source pollution on the water quality of the East River (Dongjiang) in South China. *Ecol. Indic.* 32, 294-304.
- Zahabion, B., Goodarzi, M., Massah Bouwani, A., 2010. Application of SWAT model in basin runoff estimation in future periods affected by climate change. *Clim. Stu.* (1), 45-60 (in Persian).